

**Aprítógépek vezérlésének őrléskinetikai és energetikai megalapozása**

OTKA 48446

Zárójelentés (2008)

A kalapácsos darálók a takarmányanyagok feldolgozásának, a takarmánygyártásnak tipikus vezérgépei. E gépek és rokonaik (kalapácsmalmok, röpítőtörők) jellemzője a szerkezeti egyszerűség – megbízhatóságuk kiváló. Ilyen elven működő gépeket, igen széles körben és szélsőséges méret- és teljesítőképesség-határok között, más iparokban is használnak, mint pl. a gyógyszer- és vegyiparban (többek között nagy finomságú porok előállítására), a cellulóziparban (beleértve a pépek gyártását), a bányaiparban, de a hulladék-feldolgozásban (akár nagyobb fémszerkezetek roncsolására, darabolására) és más mezőgazdasági iparokban is.

A gépek őrlő terében a fő vagy jellemző aprító „igénybevétel”, az aprítás hagyományos terminológiája szerint, „szabad ütés” ill. ütközés, azonban ez másodlagos hatásokkal bővül, mint az attríció (dörzshatás) és más (pl. nyíró stb.) igénybevételek. A mozgásállapot fenntartása, ami az aprító hatás forrása, jelentős súrlódási veszteségekkel jár; az őrlés hatásfoka igen rossz – jó, ha 1 %. A gépi folyamat modellezése, géptani leírása – a jelentős és kiterjedt elméleti és kísérleti kutatások ellenére – máig sem teljes; az őrlési folyamat vezérlése az anyagjellemzők és a kívánt termékminőség, valamint a technológiai igények függvényében csak egyedi, empirikus próbák után, hozzávetőleges megbízhatósággal valósítható meg.

A kutatás célja az aprító térben zajló folyamat, modellkísérletekre alapozott, őrléskinetikai leírásának fejlesztése volt. Kialakítottunk egy olyan számítógépes mérő-érzékelő és adatfeldolgozó rendszert, amely a kísérleti célok szolgálatán túl már egy automatikus vezérlő rendszer félüzemi (pilot-plant) példányának is tekinthető.

A kísérleti és mérési elv, a modellfüggvények a hasonlóság elvének megfelelően kiterjeszthetők a rokon típusokra, de megfelelő adaptáció után bármilyen más aprítási folyamatra vagy aprítógépre (malomra) is.

Az aprítógépek géptani vizsgálata során eddig elért eredményeket alapul véve, és a korábban kiépített kísérleti berendezés felhasználásával állítottuk össze az új mérő rendszert. A rendszer alkalmas a korábbi fokozatonkénti beállítások közötti állapototokat folytonos tartományban mérni. A nagy sebességű adatfelvétel biztosítja a változó (instacionárius) üzemszakaszok precíziós felvételét is, amely a tranziens folyamatok tanulmányozását teszi lehetővé.

**A laboratóriumi mérő rendszer**

A Zenit Junior kalapácsos daráló (1. ábra) eredetileg három-fokozatú (három-lépcsős) ékszíj hajtását átalakítottuk. A Leroy Somer (LS132ST) típusú, 5,5 kW teljesítményű egy póluspárú, háromfázisú, aszinkron-motorhoz egy teljesítményben és terhelhetőségben is hozzá illesztett frekvenciaváltót választottunk (2. ábra). A frekvenciaváltó segítségével az 50 Hz-es (3000/min) szinkron motor-fordulatszámot fokozatmentesen tudtuk állítani 0 és 400 Hz között.

A kísérletek során **mértük** a hajtó és a hajtott tengelyek **fordulatszámát**, a frekvenciaváltón átmenő **teljesítmény** értéket. A daráló tengelyére ragasztott nyúlásmérő bélyegek segítségével mértük a mechanikai **nyomatékot** (3. ábra). A bélyegek kivezetéseit a tengelybe mart horonyban vezettük ki a tengelyvégre, ahonnan csúszógyűrűs jelszedők segítségével vittük tovább a jelet. A fordulatszám mérését reflexiós elven működő jeladók segítségével oldottuk meg. (3.b ábra)

A szemes termény tömegáramának meghatározásához **a kifolyó anyagmennyiségek tömegének változását** mérlegcella segítségével regisztráljuk. (4. ábra)

A rendelkezésre álló adatokat a SPIDER 8-típusú mérő adatgyűjtővel rögzítjük. Az adatgyűjtő alapkiépítésben alkalmas 8 független paraméter egyidejű mintavételezésére. Az első két csatorna (0 és 1) alkalmas impulzus jellegű mennyiségek fogadására a 6 és 7-es csatorna univerzális távadó kimenetek fogadására alkalmas (0-10V, 4-20mA) a többi csatornára teljes hidat, fél hidat lehet bekötni. (5. ábra)



1. ábra

A felműszerezett Zenit Junior kalapácsos daráló



2. ábra

OMRON 3G3MV típusú 5,5 kW-os  
frekvenciaváltó



4. ábra

PW2KRC3 típusú erőmérő cella



a)



b)

3. ábra

- a) Nyúlásmérő bélyeg a tengelyre ragasztva  
b) SK6-típusú csúszógyűrűs jelszedő a tengelyvégen és fordulatszám-adó



5. ábra

SPIDER 8 típusú mérő adatgyűjtő

A mérési összeállítás vázlatát a 6. ábra szemlélteti.

### A közvetlenül mért, beállított és vezérelt jellemzők

Az aprítógép teljesítőképességét a feladott (belépő) és a kilépő anyag **tömegárama** (kg/s vagy t/h), amelyek stacionárius esetben azonosak, adja meg adott őrlményfinomságra. A szemcsefinomság mintákon végzett közvetett mérések (szitaanalízis) adataiból, a szemcseméret-eloszlási görbe ismeretében definiálható, megadható adat. Közvetlen, egyidejű mérése a folyamatban nem megoldott, jelenleg csak kézi inputtal, az alapjel-képzésben kapcsolható a vezérlő programhoz. A kutatás egyik célja olyan finomságfüggő fizikai-mechanikai jellemző kidolgozása, amely közvetlenül mérhető és ehhez alkalmas mérő-átalakító jeladó fejleszthető ki. Ezt a kialakított mérőrendszer lehetővé teszi. Az instacionárius üzemállapot (a belépő és a kilépő anyagáram nem azonos és az idő függvényben változik) leképezéshez szükséges felvételekre a felépített rendszer, a számítógépes adatfeldolgozással kiegészítve, ugyanúgy alkalmas.

Az aprítási folyamatot, az aprító elemek, az őrlő tér és a pánccélzat kialakításán túl, a **töltet** (az őrlő térben pillanatnyilag tartózkodó anyag) tömege és mozgásállapota határozza meg. A töltettömeg pontosan a belépő és a kilépő tömeg (kg) idő szerint felvett diagramjainak összehasonlításával határozható meg. A mérő rendszer ehhez képes folyamatosan érzékelni a feladásra előkészített anyag súlyát, ill. annak fogyását valamint a kiömlő anyag súlyát

(gyűlését), a számítógép feldolgozásra alkalmas formában rögzíti a nyert tömeg-idő függvényeket.

A töltet mozgásállapota az egyes aprózódó szemcsék mozgásának, ütközéseinek összessége, amelyet az elemi kölcsönhatások összeadódva határoznak meg. Ennek vizsgálatához a legfontosabb dinamikai paraméter, a töltet tömege és a szemcseméret tömeg szerinti eloszlása mellett, a **forgórész kerületi sebessége**, amely egyúttal bemeneti jellemző is. A mérőrendszerrel az erősen kiszélesített és megnövelt fordulatszám-tartományban lehetővé vált folytonos dinamikai függvények felvétele és a nevezetes értékek, értékpárok örléskinetikai analízise, beleértve a modellalkotást is. Ugyanúgy, és csak a most felépített mérő körrel, lehetőség nyílik a fokozatmentesen változtatható fordulatszám, mint vezérlő jellemző, hatásának tanulmányozására, ill. a felhasználás géptani, vezérléstechnikai feltételeinek kidolgozására.

A töltet dinamikai jellemzői függvényében alakuló terhelés kinetikai vizsgálatához mérjük a **forgórész-tengelyen ébredő nyomatók** és a felvett információt, ill. nyomatókfüggvényeket az örlés elméleti analízisében használjuk fel.

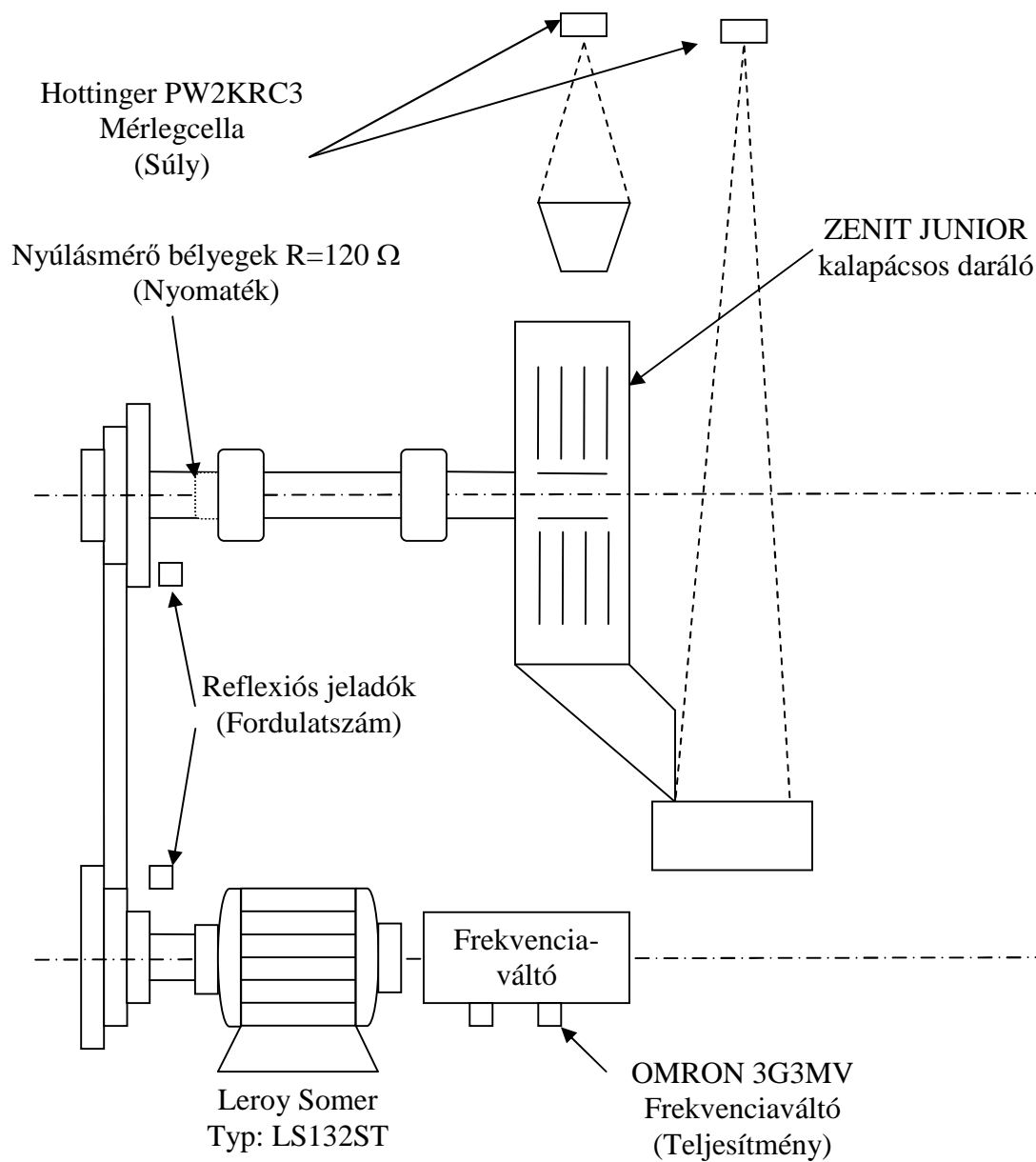
A kutatás egyik legfontosabb célja az aprítás **energetikai viszonyainak**, a **hatásfokot** (amely a jelenlegi aprítógépeknél rendkívül rossz) meghatározó szerkezeti, dinamikai és folyamatjellemzőinek részletes hatáselemzése és megalapozni a folyamat-hatásfok jelentős javítását. Ehhez nagyszámú felvételre van szükségünk, többféle szerkezeti változat, beállítás, anyagállapot és termékfinomság mellett, ami a felépített mérőrendszerrel hatékony, egyidejű sokparaméteres felvételekkel lehetséges.

## Mérési felvételek

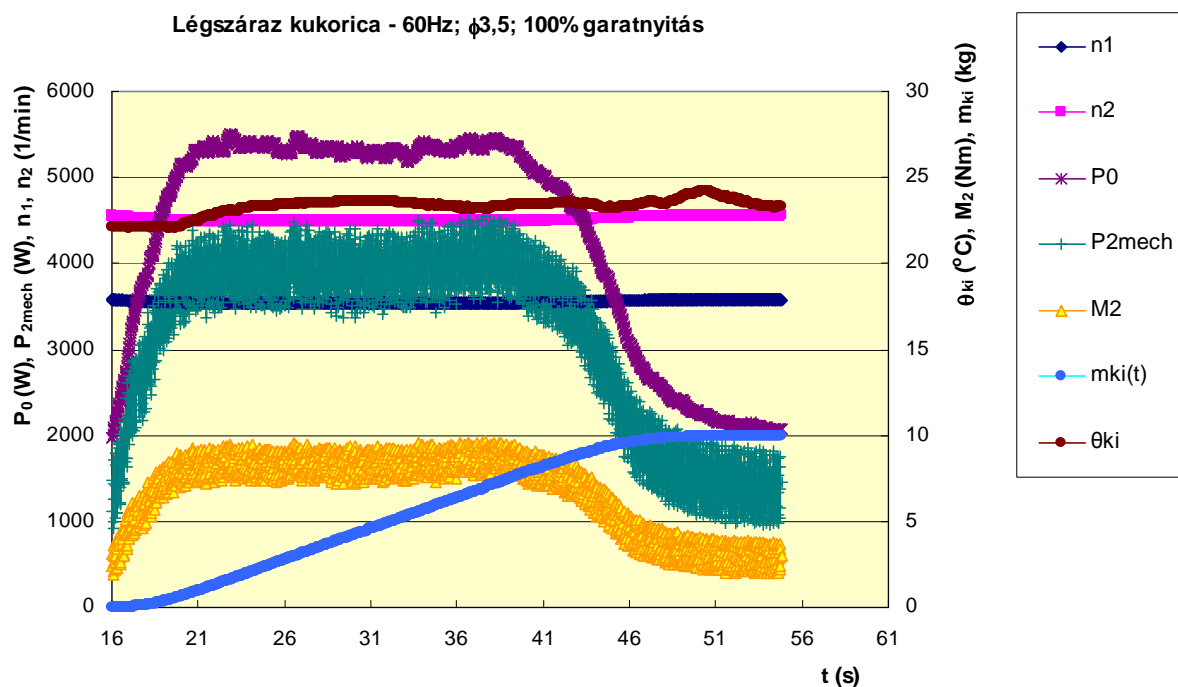
A laboratóriumi mérések különböző és különböző állapotú szemes anyagok aprításával, különböző gépbeállítások (adagoló keresztmetszet, rostaméret, rostageometria és kalapácssebesség, vagyis főtengely-fordulatszámfrekvencia) mellett, többszörös ismétléssel folytatók. A felvételeket számítógépen rögzítettük és dolgoztuk fel (7. ábra). Az örlésminták szemcseméret-eloszlását laboratóriumi szitaanalízissel vettük fel (8. ábra), az eloszlások analízise saját fejlesztésű szoftverek segítségével történt (9-10. ábra).

A mérési felvételt három szakaszra lehet felbontani: az indítási (feltöltődési instacionárius), az állandósult (stacionárius) üzemállapotra – amely tulajdonképpen a gép technológiai használatát jellemző normális üzemmód – és a kiürülésre, amikor a folyamat visszatér az üresjáráshoz. Az állandósult üzemállapot (11. ábra) vizsgálata szolgáltat empirikus alapot a fő örléskinetikai összefüggések (kalapácssebesség-tömegáram, tömegáram-darabfinomság, tömegáram-teljesítményigény és a töltethatás függvények), valamint a származtatott, ill. a különböző keresztfüggvények analitikájához.

Az instacionárius folyamat analízise a dinamikai folyamatok modellezését szolgálja, különösen a töltettel kapcsolt kölcsönhatások kiderítéséhez (16. ábra). Kutatásunk ebben a tekintetben figyelemre méltó eredményt hozott; sikerült alapösszefüggéseket találnunk az ütközéses malmok, röpítő-törők és a hasonló elven működő aprítógépek elméleti leírásához.



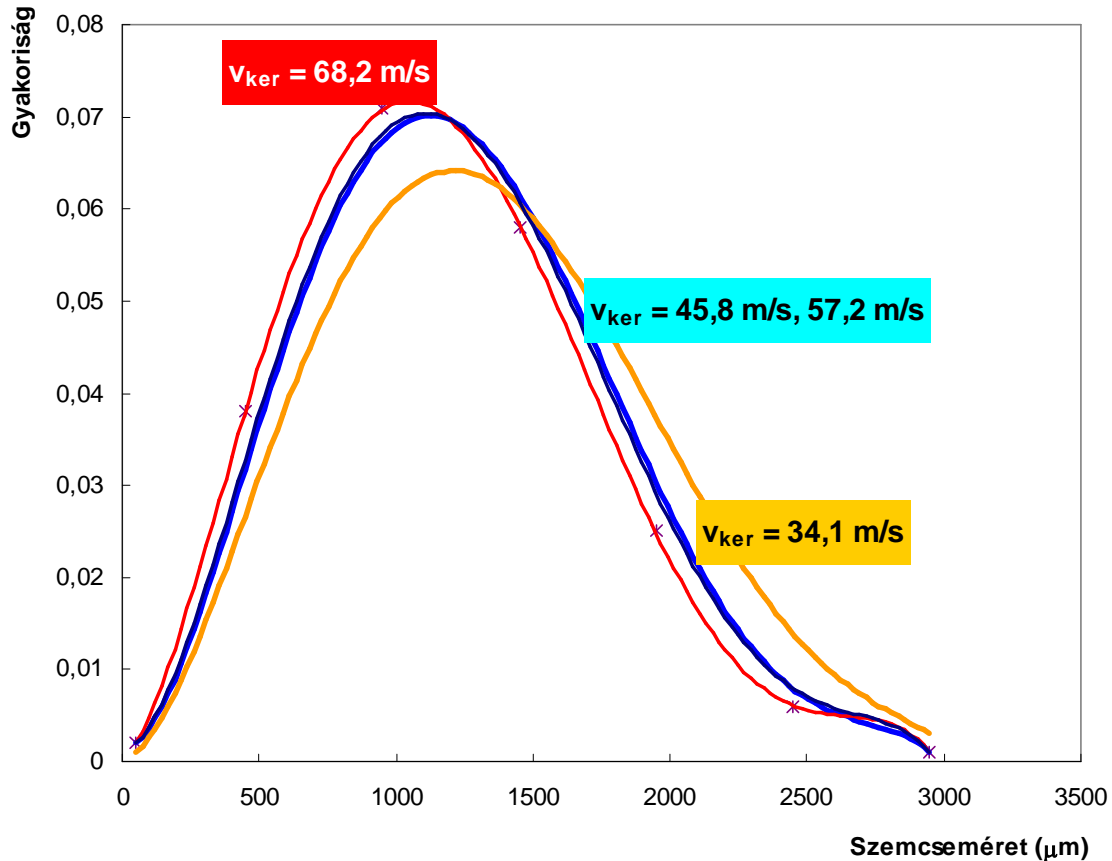
6. ábra  
A mérési összeállítás sematikus vázlata



*Adagörlés: 10 kg légszáraz szemes kukorica, 60 Hz bemenő frekvencia -  $\phi 3,5$  mm rostaméret  
– teljes garatnyitás*

*ahol  $n_1$  – motor-fordulatszám;  $n_2$  – rotor-fordulatszám;  $P_0$  – hálózathál felvett teljesítmény;  
 $P_{2mech}$  – bemenő mechanikai (tiszt) teljesítmény;  $M_2$  – a rotortengelyen mért nyomaték;  $m_{ki}(t)$   
– a kiömlő tömeg az idő függvényében regisztrálva;  $\theta_{ki}$  – dara-hőmérséklet*



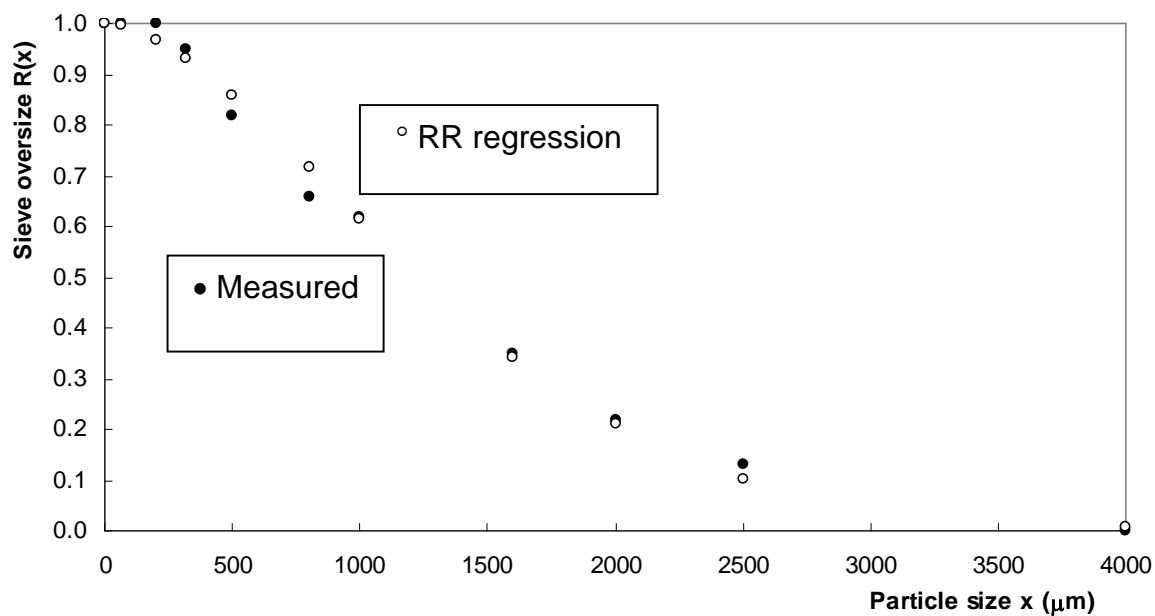


8. ábra

A kalapácssebesség hatása a szemcseméret-eloszlásra  
 (kukorica, nedvességtartalom: 10,5 %, rostaméret: Ø3,5 mm,  
 frekvencia: 60 Hz, garatnyitás: 100 %)

A kerületi sebesség (a kalapácssebesség) növelésével nem csak a tömegáram (a gép teljesítőképessége) nő, de nő az őrlemény finomsága is. Ugyanakkor az eloszlás is „szűkül” (8. ábra), vagyis szemcseméret eloszlási tartománya csökken. A hatás nem látszik egyértelműnek; itt pl. a 45,8 és az 57,2 m/s sebességhez tartozó eloszlások sűrűséggörbéi gyakorlatilag fedik egymást. Ezt a tömegáram-darabinomság függvény magyarázza.

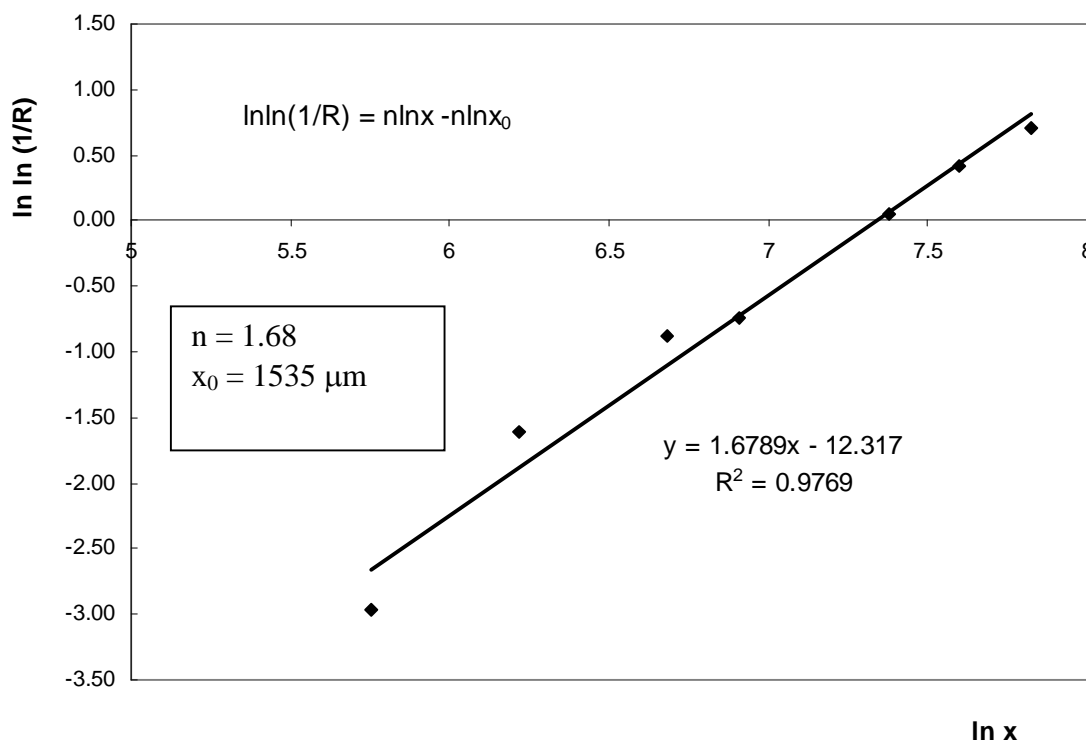
A valóságos teljes őrleményhalmazok szemcseméret-eloszlásának elméleti modellezésében kritikus probléma az alsó és a felső szemcse-határméret figyelembe vétele, beleértve azok pontos megállapítását. A 8. ábra sűrűséggörbéi a paraméteres felső (maximális) határméret becslését lehetővé teszik; láthatóan nem a kalapácssebesség, hanem a rostajellemző határozza meg az értékét.



9. ábra

Kukoricadara szitamaradék (R(x)) diagramja

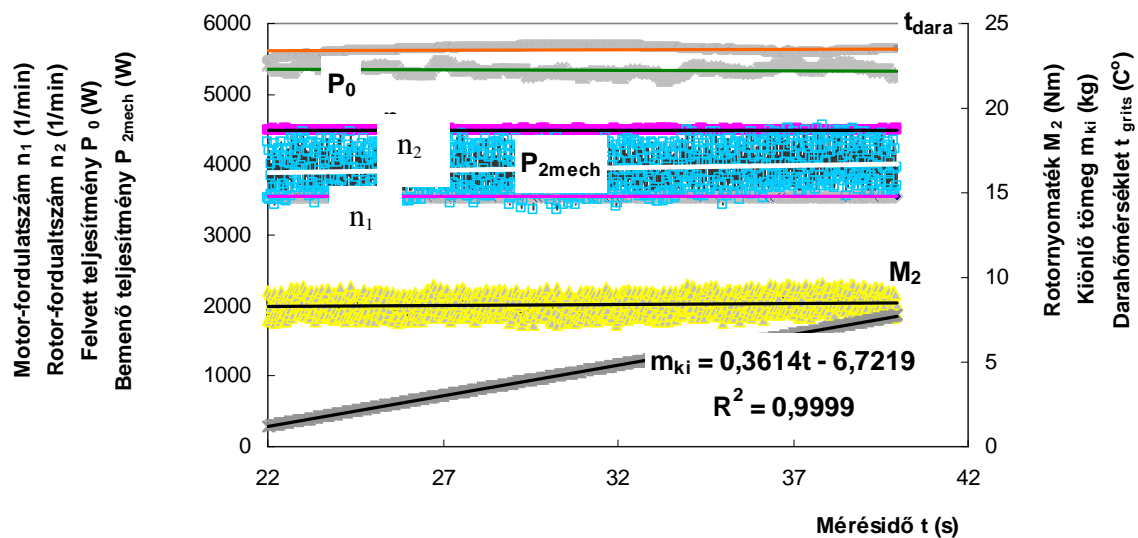
(Measured: mért értékek – RR regression: az RR eloszlásmodell szerint illesztett értékek. A vízszintes tengelyen a szemcseméretnek valójában a laborszita-méretnek.)



10. ábra

A 9. ábra szitamérési adatainak illesztése RRB hálón





11. ábra

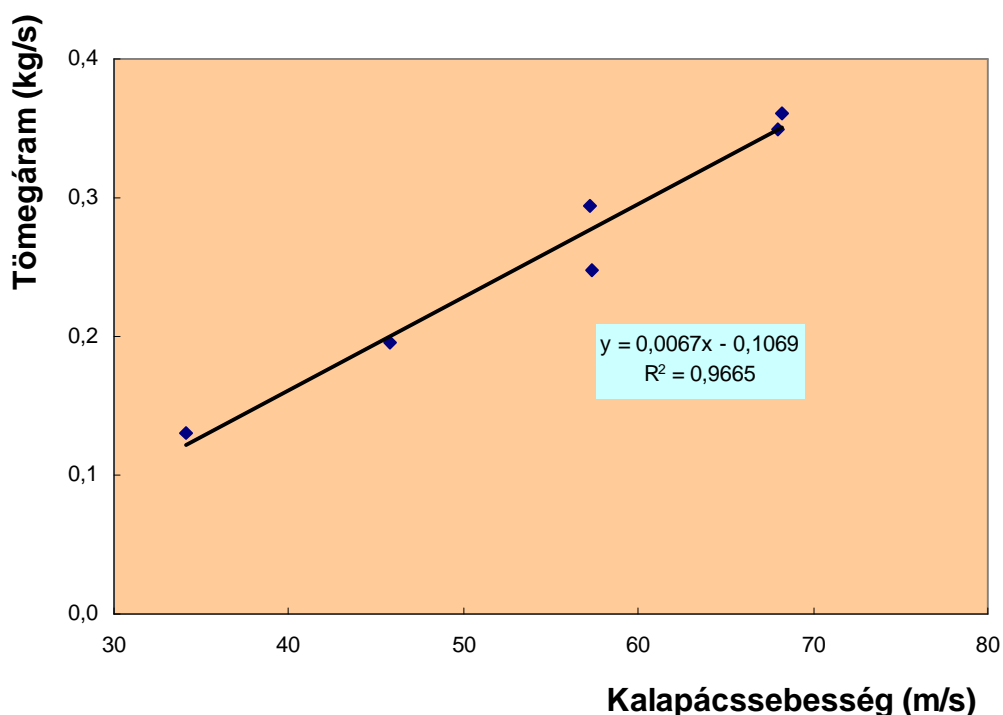
A stacionárius tartományban felvett görbék

(kukorica, nedvességtartalom: 10,5 %, rostaméret: Ø3,5 mm, frekvencia: 60 Hz, garatnyitás: 100 %)

A stacionárius tartományt a teljes felvételtől (7. ábra) vágjuk ki, attól a ponttól, amikor a gép „telitődik” – a töltet, a tömegáram, a terhelő nyomaték és a felvett teljesítmény állandósul, tulajdonképpen minden dinamikai változó állandó. Minden mérésünk bizonyította, hogy a homogénnek korántsem tekinthető anyag, a gravitációs feladás kis garaton mégis nagyon szoros lineáris ill. konstans karakterisztikákat ad. Az ezekből megfogalmazott, származtatott összefüggések megbízható alapot képeznek a folyamatörvények megfogalmazásához.

## Eredmények

A kerületi sebesség és a gép teljesítőképessége közötti összefüggés (12. ábra), a jellemző üzemi tartományban, nagyon szorosan lineáris. Eszerint a függvény deriváltja (a folyamategyenlet egyik parciális deriváltja) empirikus konstans, így törvényszerűségnek tekinthető. Ettől az összefüggéstől azt várjuk, hogy hozzájárul az aprító térben mozgó halmaz („örvényágy”) mozgásállapotának, kinetikai kölcsönhatásainak leírására vonatkozó hipotézisünk bizonyításához.

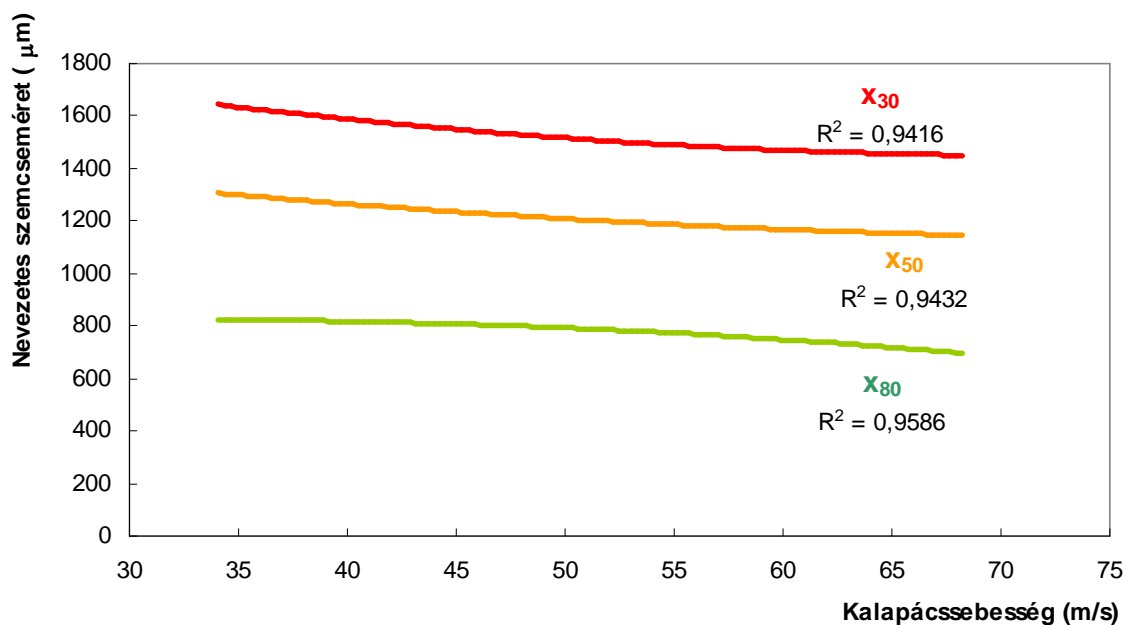


12. ábra

Összefüggés a kalapácssebesség és a gép teljesítőképessége (tömegárama) között  
(*kukorica, nedvességtartalom: 10,5 %, rostaméret: Ø3,5 mm*)

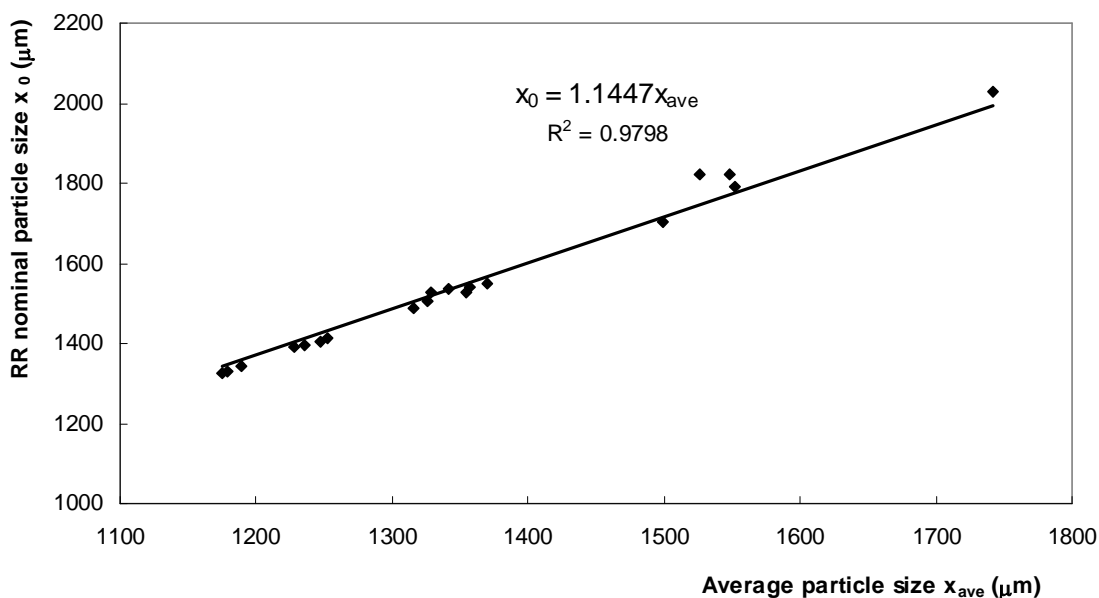
A gyakorlati alkalmazások számára szerkesztettük meg a 13-15. ábrák karakterisztikáit; a felhasználót leginkább a gyártott szemcseméret érdekli, azonban az eltérő szemcseméretekkel összeálló halmaz jellemzése eléggé komplikált a szakirodalomban. Az egyik praktikus adat valamilyen nevezetes szemcseméret (amelynél a darahalmaz adott százaléka nagyobb, ill. kisebb méretű – tulajdonképpen az a méretű szitabevonat, amelyen a dara adott hányada fennmarad, míg a másik hányad átesik). Többek között ezt a jellemzőt is vizsgáltuk a különböző változók, ill. paraméterek függvényében. A sebességgel egyértelműen nő a termék finomsága, azonban a hatás láthatóan nem erős. A tömegáram viszont erősen nő a sebességgel, így az ún. „finomságprodukciónak” hatásosan befolyásolható a sebesség vezérlésével, vagyis a gép gyártóvonalba illesztését a fordulatszám-vezérlés jól szolgálja.

A szakirodalom és különböző régi és új szabványok különböző, látszólag erősen eltérő finomságjellemző, nevezetes szemcseméreteket adnak meg, használnak. Mérési adataink feldolgozásából egyszerű és határozott empirikus összefüggéseket találtunk közöttük, a különböző takarmányipari anyagörleményekre, amelyek elméleti igazolása is megtörtént. Az eredmény megfordítása felhasználható az eltérő eloszlásmodellek összehasonlítására, de az egyes modellek igazolására vagy kritikájára is.



13. ábra

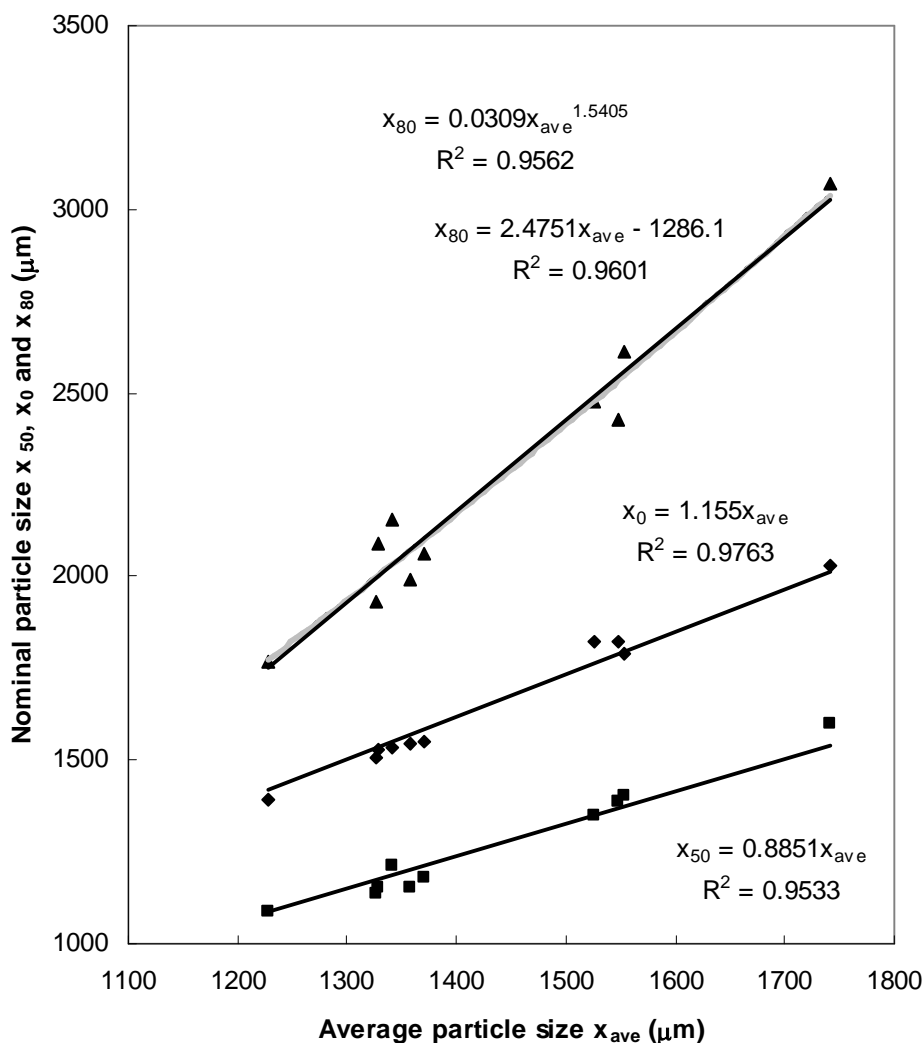
A kalapácssebesség hatása a nevezetes szemcseméretekre  
 (kukorica, nedvességtartalom: 10,5 %, rostaméret: Ø3,5 mm)  
 (a 30, 50 és 80 % szitamaradékhoz tartozó szemcseméretek aránya)



14. ábra

Lineáris összefüggés a dara átlagos szemcsemérete (*average particle size*) és az RR eloszlás szerinti nevezetes szemcsemérete ( $x_0$ ) között

1995, 2005, 2006 években végzett kísérletek adataival, eltérő sebességek, rostaméretek és tömegáramok mellett, légszáraz kukorica fajták aprításakor



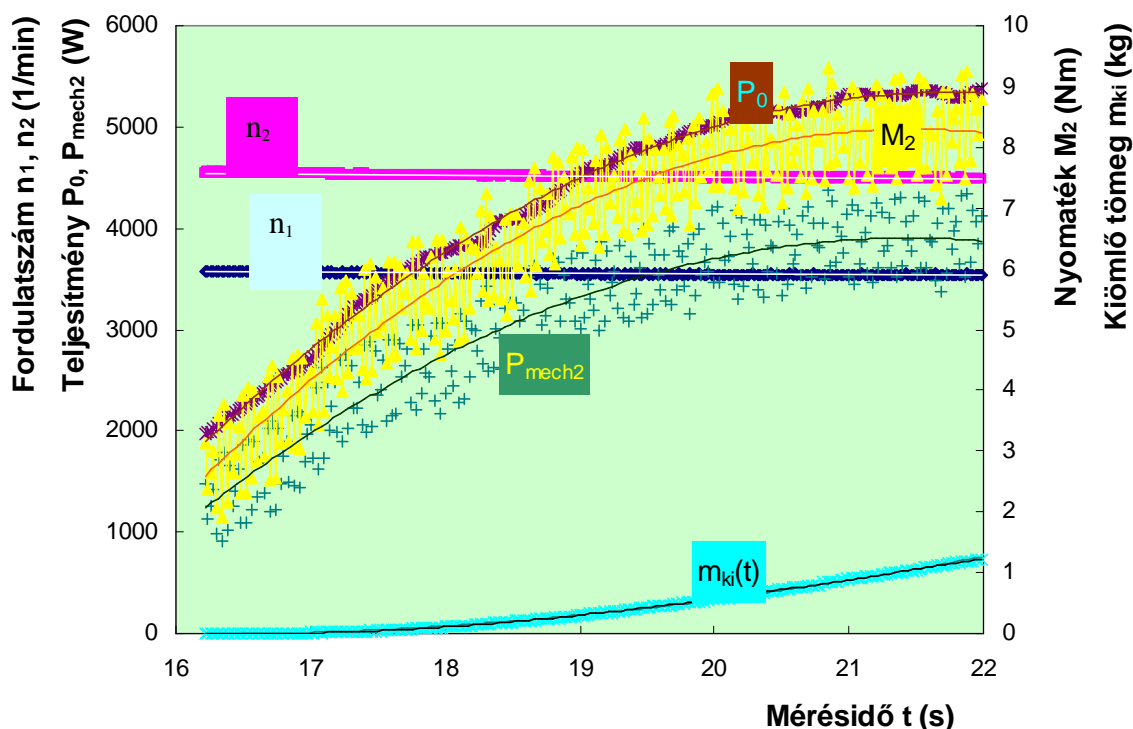
15. ábra

Összefüggés a dara átlagos szemcsemérete (*average particle size*) és különböző nevezetes szemcseméretei ( $x_{50}$ ,  $x_0$ ,  $x_{80}$ ) között  
 1995, 2005, 2006 években végzett kísérletek adataival, eltérő sebességek, rostaméreték és tömegáramok mellett, légszáraz kukorica fajták aprításakor

A kalapácsmalmokon, takarmányüzemi kalapácsos darálógépeken, gravitációs feladás esetén, az anyagáram indítására, állítására, megállítására leggyakrabban alkalmazott gépelem a tolózár. A tolózárnyitás ill. -zárás hatása – mely a bemeneten ugrásfüggvénynek tekinthető – tranziens folyamatokon keresztül jelenik meg a kimeneten. A különböző tolózár állások hatását, széles fordulatszám tartományban, különböző kinetikai viszonyok mellett és anyagpróbákon vizsgálva, meghatározható az adott géptípusra jellemző „átmeneti függvény”. Ennek ismeretében már könnyebb egy szimulációs modell felállítása, amely egyaránt szolgálja egy programvezérlési szoftver kidolgozását, valamint a gép őrlésfüggvényének felírását. Jelenleg még csak empirikus összefüggéseink vannak a folyamatról, de az eddigi ismereteknél pontosabb – egy új módszeres analízishez is alkalmas – eredményeket nyertünk.

Az instacionárius szakasz felvétele (16. ábra) és annak feldolgozása ennek a változó üzemiállapotnak elméleti analíziséhez szolgál pontos kinetikai információkkal.

### Kukorica, $\phi 3,5$ 60-100 instacioner, felvétel



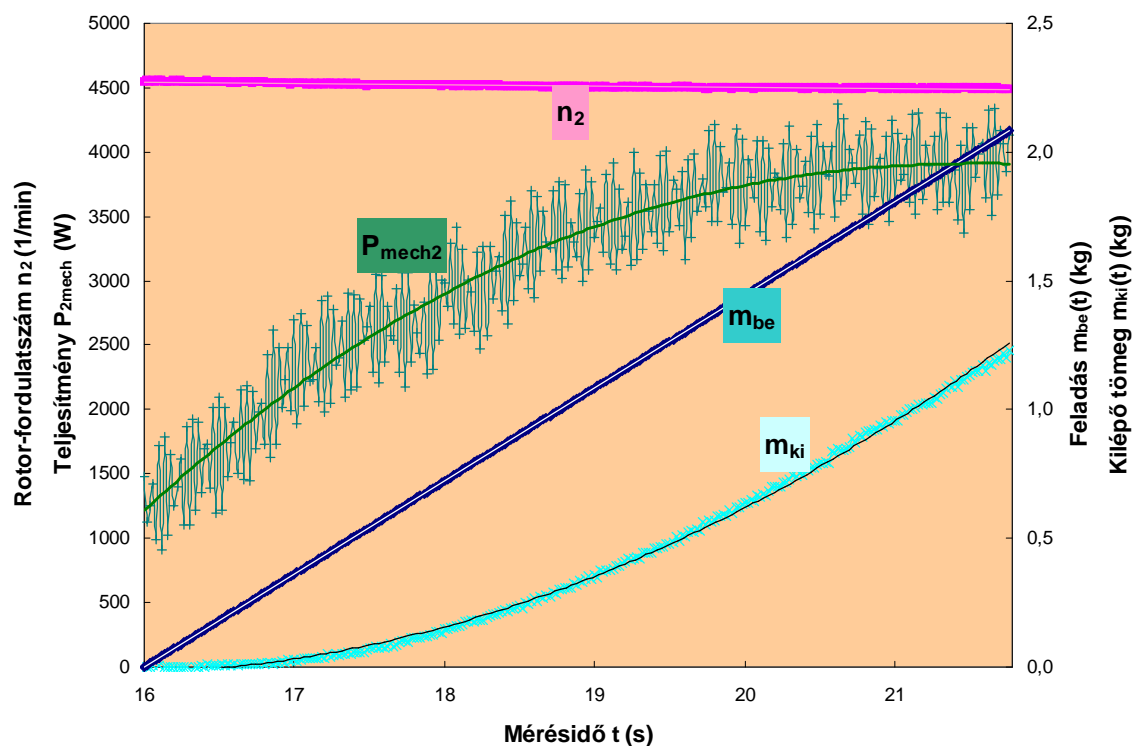
16. ábra

Indítási szakasz

Kukorica aprítása;  $\phi 3,5$  mm-es rostán, 60 Hz-es motorfrekvencián, teljes (100 %) garatnyitásnál

Az aprítási folyamatot, az aprító elemek, az őrlő tér és a páncélzat kialakításán túl, a töltet (az őrlő térben pillanatnyilag tartózkodó anyag) tömege és mozgásállapota határozza meg. A **töltet**, megítélésünk szerint, az egyik legfontosabb dinamikai változó minden folyamatos üzemű őrlő-aprító gép mechanikai, energetikai és őrlésdinamikai analízisében. A töltet tömege pontosan a belépő és a kilépő tömeg (kg) idő szerint felvett diagramjainak összehasonlításával határozható meg (17. ábra). Az aprítási idő, amely az őrlő kamrában tartózkodó anyag őrlő-aprító igénybevételének átlagos (várható) ideje, a töltettel kapcsolt változó.

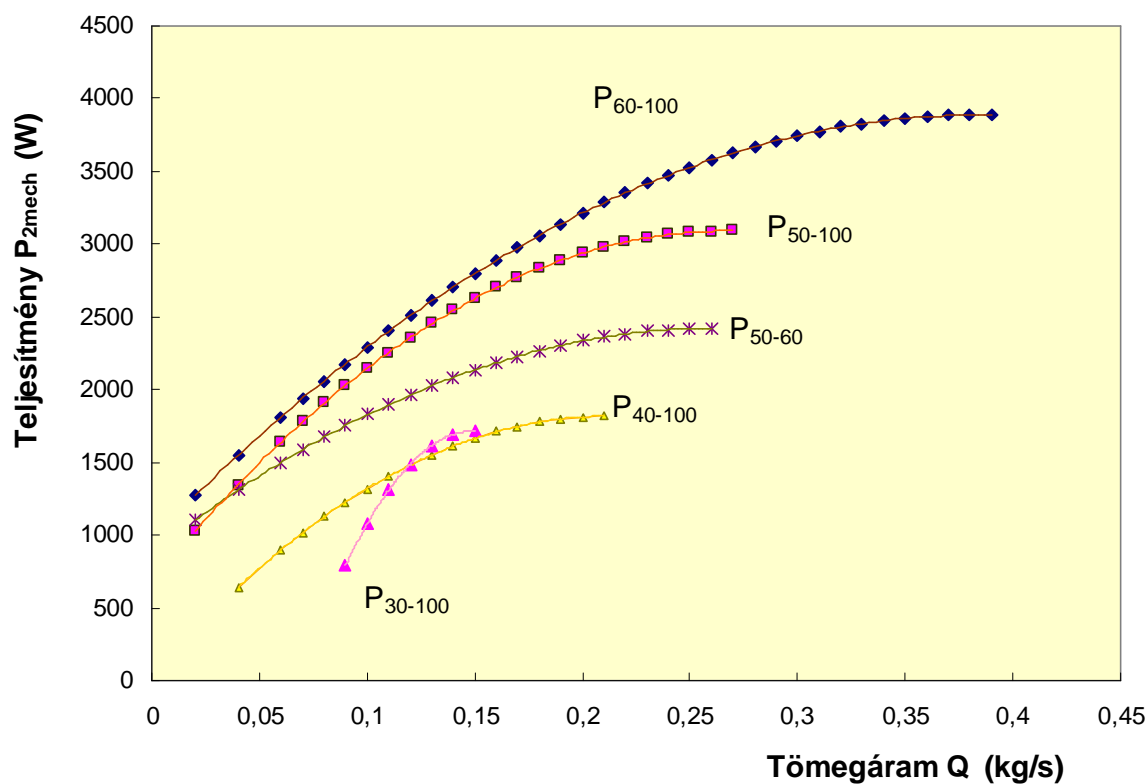
A tömegáram-teljesítményigény sebességparaméteres felvételei nagyon jó illeszkedésű másodfokú görbéket adtak (18. ábra) a mérési tartományban. Ez egyúttal azt jelenti, hogy a tranziens görbék derivált görbéi egyenesek (19. ábra), ami pedig alapegyenlet felállítását teszi lehetővé. A töltet (a pillanatnyilag az aprító térben tartózkodó anyag mennyisége) és a teljesítmény-felvétel összefüggése lineáris a mérési tartományban (20. ábra), ami egy újabb alapegyenlet, de legalábbis törvényelem, képzésének forrása, különösen, ha összevetjük ezeket a 12. ábrán bemutatott összefüggéssel.

Kukorica,  $\phi 3,5$  rosta, 60-100

17. ábra

Az indítási szakasz analitikája

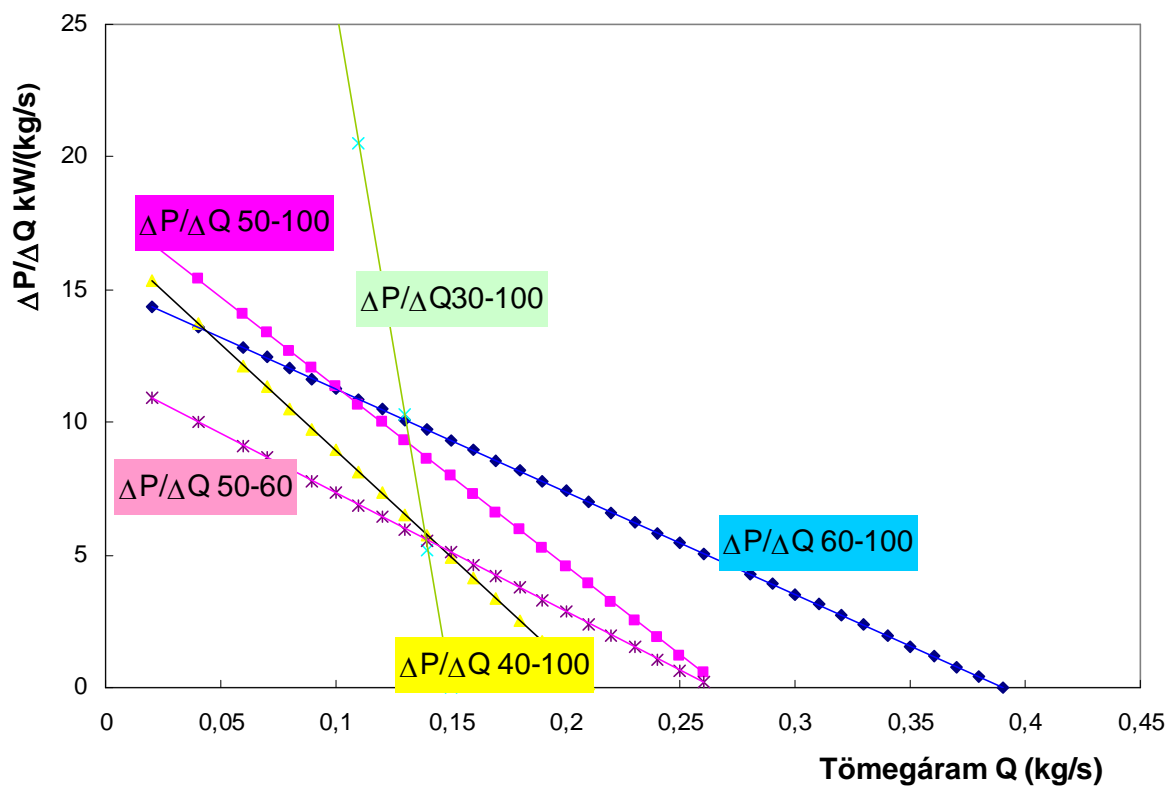
Kukorica aprítása;  $\phi 3,5$  mm-es rostán, 60 Hz-es motorfrekvencián, teljes (100 %) garatnyitásnál

**Kukurica,  $\phi 3,5$  rosta**

18. ábra

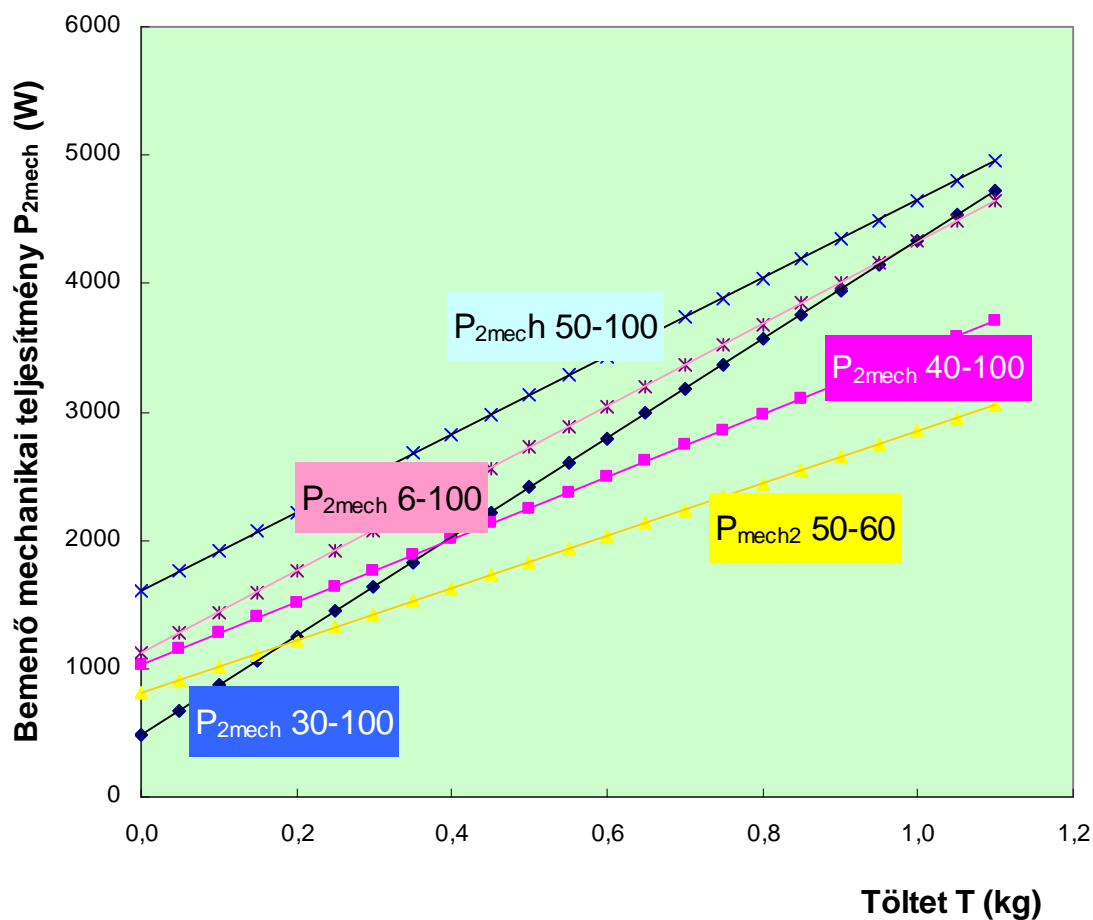
A tömegáram és a nettó teljesítmény összefüggése a tranziens szakaszban  
(60, 50, 40, 30 Hz motorfrekvencián, 100% ill. 60% garatnyitással)



Kukorica,  $\phi 3,5$  rosta

19. ábra

A tiszta teljesítmény tömegáram szerinti parciális deriváltja  
(60, 50, 40, 30 Hz motorfrekvencián, 100% ill. 60% garatnyítással)

**Kukorica,  $\phi 3,5$** 

20. ábra

A tiszta teljesítményigény a töltet függvényében  
(60, 50, 40, 30 Hz motorfrekvencián, 100% ill. 60% garatnyitással)